

ДВОЙНОЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
НУКЛОНОВ С ЯДРАМИ

А. В. Елицинский

УДК 539.171

В работе предложено аналитическое выражение двойного дифференциального сечения, пригодное для использования при расчете защиты в диапазоне средних энергий.

Полные сечения были представлены в виде суммы парциальных сечений, соответствующих различным механизмам взаимодействия нуклона с ядром: дифракционное рассеяние, квазиупругое рассеяние и каскадный процесс. Остальными типами взаимодействия пренебрегалось, так как или их вклад в указанном диапазоне энергий мал, или их роль при расчете защиты не определяющая.

В случае образования вторичных протонов при облучении ядер протонами ( $p \rightarrow p$  взаимодействие) вклад каждого типа взаимодействия и отсутствующие в литературе характеристики были найдены путем анализа имеющегося экспериментального материала [1,2,3] для ядер C, Si и U при энергии протонов 160, 360 и 660 Мэв. Все элементы расчета двойного дифференциального сечения представлены в виде аналитических выражений. Численные параметры в эмпирических формулах найдены методом наименьших квадратов. Приведенные выражения\*) справедливы для энергий вторичных нуклонов  $\geq 50$  Мэв. Экспериментальные данные по полному интегральному сечению, собранные в работе [4] для интервала энергий 100+700 Мэв, с точностью  $\pm 5\%$  описываются выражением:

$$\sigma^{\text{tot}} = 2\pi R^2 \left( 1 - \frac{15}{A} \left[ 0,5 + \frac{55}{E_0 - 50} + 10^{-3} E_0 (1 - 0,03A^{1/3}) \right] \right), \quad (I)$$

\*)

Используются обозначения: E - энергия, Мэв;  $\theta$  - угол вылета в лабораторной системе координат, радиан, и A - атомный вес ядра-мишени.

где  $R = 1,2 \cdot 10^{-13}$  (см)  $A^{1/3}$ . Для сечений дифракционного рассеяния использовались известные из литературы /4/ выражения. Значение коэффициента прозрачности  $a = 0,9 \cdot A^{-1/4}$  было найдено по данным эксперимента /3/ для 660 Мэв и использовано во всем диапазоне энергий. Доли участия основных механизмов с точностью  $\pm 20\%$  описываются выражением:

$$\varepsilon_{pA \rightarrow p} = \frac{\sigma_{\text{casc}}}{\sigma_{\text{qel}}} = 6,8 \cdot 10^{-4} (E_0 + 590) A^{1/6}. \quad (2)$$

При квазиупругом рассеянии нуклонов на всех ядрах угловое распределение вторичных нуклонов отождествлялось с распределением за счет рассеяний  $(p,p)$  и  $(p,n)$  на свободных нуклонах в ядре. Для простейшего случая равенства числа протонов и нейтронов в ядре использование данных /5/ о дифференциальных сечениях взаимодействий  $(p,p)$  и  $(p,n)$  с точностью  $\pm 15\%$  приводит к выражению:

$$\left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{qel}} = \sigma_{\text{qel}} \{ C \exp(-\alpha\theta) + D \sin(2\theta + \varphi) \}, \quad (3)$$

где при 160 Мэв  $\leq E_0 \leq 660$  Мэв:

$$C = 0,75 + 1,2 \cdot 10^3 (E_0 - 160) \text{ стер}^{-1}$$

$$\alpha = 2,9 + 9,2 \cdot 10^{-4} (E_0 - 160) \text{ рад}^{-1}$$

$$D = 0,1 - 2,4 \cdot 10^5 (E_0 - 160) \text{ стер}^{-1}$$

$$\varphi = -0,52 - 1,4 \cdot 10^{-3} (E_0 - 160) \text{ рад.}$$

Спектр энергий вторичных протонов, образовавшихся в результате квазиупругого рассеяния, принимался в виде гауссовой кривой

$$\left( \frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} \right)_{\text{qel}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta_q} \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_q \exp \left\{ - \frac{(E - \bar{E}_q)^2}{2\Delta_q^2} \right\}, \quad (4)$$

где  $\bar{E}_q = E_0(1,05 - 0,615 \cdot \theta)$ ,  $\Delta_q = 0,183 E_0 \theta$ .

Экспериментальные данные /4/ свидетельствуют об экспоненциальной форме углового распределения вторичных протонов, возникающих в результате каскадного процесса. Распространяя известные

данные на весь диапазон средних энергий и интерполируя найденные из эксперимента значения параметра для промежуточных величин атомных весов, была найдена общая зависимость:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{casc}} = \frac{\sigma_c(1 + b^2)}{2\pi[1 + \exp(-b\theta)]} \exp(-b\theta), \quad (5)$$

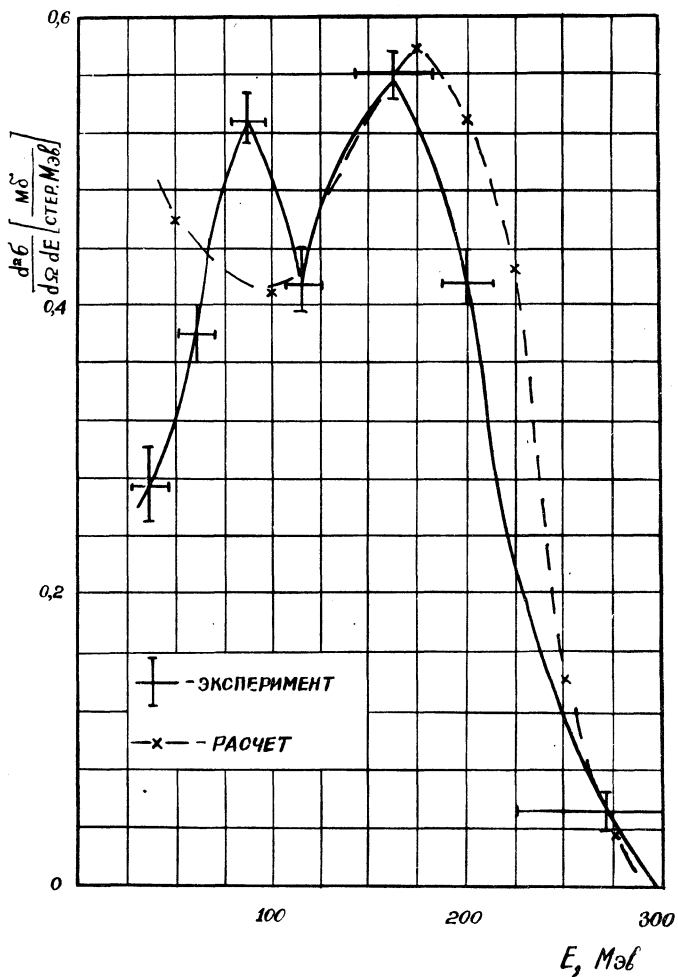
где  $b = 3,8 - 6,3 \cdot 10^{-3} A \text{ рад}^{-1}$ . Для произвольного атомного веса ядра в интервале средних энергий спектр каскадных протонов удалось представить только как сумму двух пиков. Форма обоих пиков удовлетворительно описывается гауссовскими кривыми. Относительный вклад каждого пика в спектр и определяющие их параметры находились путем подбора, обеспечивающего наилучшее описание всего экспериментального материала. Точность порядка  $\pm 20\%$  достигается применением следующих выражений:

$$\left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}\right)_{\text{casc}} = \frac{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_c}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{\exp\left[-\frac{(E-\bar{E}_1)^2}{2\Delta_1^2}\right]}{\Delta_1 \left(1 + \frac{A^{1/3} E_0^{3/2}}{9,4 \cdot 10^3}\right)} + \frac{\exp\left[-\frac{(E-\bar{E}_2)^2}{2\Delta_2^2}\right]}{\Delta_2 f \left(1 + \frac{9,4 \cdot 10^3}{A^{1/3} E_0^{3/2}}\right)} \right], \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \bar{E}_1 &= E_0(0,914 - 0,73\theta), & \Delta_1 &= E_0(0,06 + 4,3 \cdot 10^{-2}\theta), \\ \bar{E}_2 &= E_0[0,79 - 4,3 \cdot 10^{-4} E_0(1 + 1,9 \cdot 10^{-3} A) - 0,73\theta], \\ \Delta_2 &= E_0[1,62 \cdot 10^{-3} E_0^{3/4} + 4,3 \cdot 10^{-2}\theta]. \end{aligned}$$

Коэффициент  $f$  учитывает долю второго пика, обрезаемому порогом  $E = 50$  Мэв.

О взаимодействии нейтронов с ядрами и по вторичным нейтронам в литературе /4/ имеются обрывочные сведения. Поэтому для общего типа  $iA \rightarrow j$  взаимодействия нуклонов с ядрами возможно только приближенное построение двойных дифференциальных сечений. Учитывая отношение сечений взаимодействий  $(n, p)$  и  $(p, p)$  на свободных нуклонах и множественность образования различного типа нуклонов в результате каскадного процесса, отношение выходов двух ведущих механизмов взаимодействия записывалось в виде



Р и с.1. Спектр протонов под углом  $40^\circ$  при облучении  $\Delta 1$  протонами с энергией 300 Мэв. Сплошная кривая - экспериментальные данные /2/, пунктир-расчет

$$\begin{aligned} \varepsilon_{nA \rightarrow n} &= 0,36A^{1/4} \left[ 1 + 6,5 \cdot 10^{-4} (E_0 - 100) \right] \frac{0,1E_0^{1/3} + \frac{(A-Z)}{Z}}{1 + 0,1E_0^{1/3} \frac{(A-Z)}{Z}} \varepsilon_{pA \rightarrow p}; \\ \varepsilon_{pA \rightarrow n} &= 0,26A^{1/4} \left[ 1 + 6,5 \cdot 10^{-4} (E_0 - 100) \right] \left( 1 + 0,1E_0^{1/3} \frac{Z}{A-Z} \right) \varepsilon_{pA \rightarrow p}; \\ \varepsilon_{nA \rightarrow p} &= 0,7 \left[ 0,1E_0^{1/3} + \frac{(A-Z)}{Z} \right] \varepsilon_{pA \rightarrow p}. \end{aligned} \quad (7)$$

В случае взаимодействий  $pA \rightarrow n$  и  $nA \rightarrow p$  угловые распределения в результате квазиупругого рассеяния отождествлялись с дифференциальным сечением для рассеяния  $p, n$  на свободных нуклонах. Оно удовлетворительно описывается выражением:

$$\left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{pn} = C \exp(-\alpha\theta) + D \sin(4\theta + \varphi) + \xi, \quad (8)$$

где при  $160 \text{ Мэв} \leq E_0 \leq 660 \text{ Мэв}$

$$\begin{aligned} C &= 0,8 \left[ 1 + 10^{-3} (E_0 - 160) \right] \text{ стер}^{-1}; \quad \alpha = 3,2 \text{ рад}^{-1}; \quad D = 0,06 \text{ стер}^{-1}; \\ \xi &= 0,075 - 5 \cdot 10^{-5} (E_0 - 160) \text{ стер}^{-1} \quad \varphi = -3 - 2,1 \cdot 10^{-3} (E_0 - 160) \text{ рад}. \end{aligned}$$

Экспериментально найдено /4/, что и для каскадного процесса, и для квазиупругого рассеяния формы спектров всех типов взаимодействий неразличимы. Поэтому для произвольного типа взаимодействия нуклонов с ядрами нахождение интегральных и дифференциальных сечений сводится к алгоритму, найденному для взаимодействия  $pA \rightarrow p$  при использовании выражений (7) и (8).

Спектр, найденный с помощью приведенных формул, сравнивается на рисунке с экспериментальным. Серия подобных сравнений свидетельствует о том, что предлагаемый алгоритм описывает двойные дифференциальные сечения для взаимодействия  $pA \rightarrow p$  с точностью порядка 20%.

Институт ядерных исследований АН СССР

Поступила в редакцию  
17 мая 1976 г.

## Л и т е р а т у р а

1. N. S. Woll, P. R. Roos. Phys. Rev., 150, 811 (1969).
2. W. H. Hess, B. J. Moyet. Phys. Rev., 101, 337 (1956).
3. А. С. Ажгирей и др. ЖЭТФ, 36, 1631 (1959).
4. В. С. Барашенков, В. Д. Тонеев. Взаимодействия высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами, М., 1972 г.
5. W. H. Hess. Rev. Mod. Phys., 30, 368 (1950).